

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02088

研究課題名(和文) レーザー誘起プラズマ加振による機器/建屋/インフラ統合系の動特性計測と異常検知

研究課題名(英文) Dynamic characteristic measurement and damage detection of integrated machine/building/infrastructure systems via laser-induced plasma excitation

研究代表者

梶原 逸朗 (Kajiwara, Itsuro)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：60224416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、レーザーを用いた非接触加振/計測技術によりコンクリートの硬化モニタリングを実現する手法を提案した。コンクリートに挿入したアルミニウム梁(AI梁, A6063)の振動特性をレーザーで非接触加振/計測し、AI梁を支えるモルタルの状態を推定することにより、硬化モニタリングにつながる手法の構築を検討した。また、FEM解析により、AI梁のモード周波数とモルタルの弾性率の関係を見出し、AI梁の振動応答からモルタルの硬化状態を定量的に評価した。この評価に基づいて開発されたコンクリート硬化モニタリングシステムの有効性を、複数の実験により検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インフラ構造を支えるコンクリートに関し、その強度特性を十分に発揮するには、コンクリートの時間経過による特性変化をよく把握した適切な施工が必要である。一方、その複雑な特性から、技術者の経験に頼らざるを得ない状況があり、システム化に基づく定量的評価が要求されている。本研究では、レーザーを用いた非接触加振/計測技術によりコンクリートの硬化モニタリングを行う手法・技術を構築した。本手法・技術の実用化が実現すれば、構造物の特性評価およびメンテナンスの高効率化が図られるとともに、構造物の信頼性向上に大きく貢献することから、大きな学術的意義および社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)： A monitoring system for concrete hardening using laser excitation/measurement was developed in this study. Aluminum (Al) beam inserted in mortar was used as measurement object. Laser beam was irradiated to the Al beam to excite the vibration due to laser ablation and its frequency spectra were measured. It was confirmed that the characteristics on the resonance frequency and damping of the Al beam change as the mortar hardens over time. Moreover, it was found by the finite element analysis that there is a relationship between the hardness of the mortar and the natural frequency of the Al beam inserted in the mortar. By comparing the theoretically calculated frequency with the experimental result, the elastic modulus of the mortar and its variation with time could be estimated. The effectiveness of the developed monitoring system for concrete hardening was verified by some experiments.

研究分野：レーザー応用技術，機械力学，制御工学

キーワード：レーザー 振動計測 ヘルスマニタリング 損傷検知 インパルス応答

1. 研究開始当初の背景

機器、建屋、インフラ構造の各システムのみならず、これらを統合したシステムに対し、広周波数帯域/高周波数帯域の振動特性を非接触で高精度に計測できるシステム、および同一の加振/計測系により統合系のヘルスマonitoringを統一的に行うシステムの要求が極めて高い。入力作用および出力計測をともに非接触化できれば、計測対象に加振・計測のためのデバイスを付加することなく、信頼性の高い計測が実現される。さらに、人が立ち入れない危険領域における振動試験を容易に行うことができる。研究代表者は、パルスレーザーにより発生するLAおよびLIBからインパルス加振力を生成する非接触振動試験法を開発し、レーザー計測技術と併用することにより、入力作用および出力計測をともに非接触化することに成功した。そして、膜構造の真空環境振動試験、HDDスマートヘッドアクチュエータの振動計測、ボルト締結体および膜構造のヘルスマonitoringなどに応用することにより、本技術の有効性を検証した。本技術をベースとして、高周波数帯域振動計測の計測精度・再現性・信頼性に関する従来性能のブレークスルーを経て、高感度のヘルスマonitoring技術が構築され、コンクリート構造を含むインフラ構造をはじめ、危険領域・極限状態における振動計測・異常検知への展開が期待できる。

2. 研究の目的

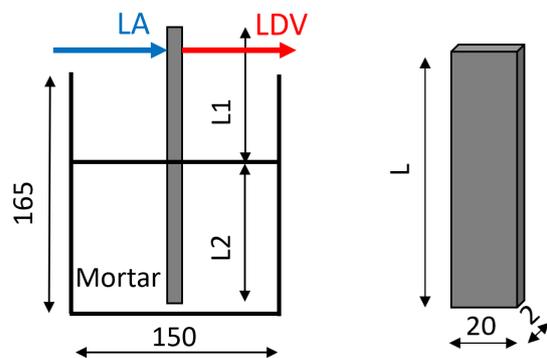
インフラ構造を支えるコンクリートに関し、その強度特性を十分に発揮するには、コンクリートの時間経過による特性変化をよく把握した適切な施工が必要である。一方、その複雑な特性から、技術者の経験に頼らざるを得ない状況があり、システム化に基づく定量的評価が要求されている。本研究では、レーザーを用いた非接触加振/計測技術によりコンクリートの硬化モニタリングを行う技術を構築する。コンクリートに挿入したアルミニウム梁(AI梁、A6063)の振動特性をレーザーで非接触加振/計測し、AI梁を支えるモルタルの状態を推定することにより、硬化モニタリングにつなげられる手法を開発する。また、FEM解析により、AI梁のモード周波数とモルタルの弾性率の関係を見出し、AI梁の振動応答からモルタルの硬化状態を定量的に評価する。そして、さまざまな梁長・材質の条件で実験およびモルタルの弾性率推定を行い、適切な梁条件について考察する。本手法・技術が実現すれば、建造物の特性評価およびメンテナンスの高効率化が図られるとともに、建造物の信頼性向上に大きく貢献すると考えられる。

3. 研究の方法

本研究では、高出力パルスレーザーを用いたレーザーアブレーション(Laser Ablation: LA)によりAI梁に加振力を作用させた。LAは、レーザー光を集光し対象に照射することで対象表面から原子等が放出される現象であり、その反作用として対象表面の法線方向に加振力が作用する。本実験では、919 mJのレーザーパワーで加振を行った。そして、計測にはレーザードップラー振動計(LDV)を使用した。

本研究の実験対象はコンクリートであるが、試験体の作りやすさとデータ取得のしやすさの観点から、硬化モニタリングの対象はW/C=50%の1:3モルタルとし、セメント1.00 kg、標準砂3.00 kg、水500 gを練り混ぜて作製した。練ったモルタルを容器に入れ、中央にAI梁を挿し、実験対象とした(Fig. 1)。Fig. 1に示すように、容器(150mm×150mm×165mm)に入れたモルタルにAI梁(20mm×L(mm)(variable)×2mm)を挿し、モルタル表面の上部で片持ち状の梁の動特性を非接触レーザー加振/計測により獲得する。さまざまな梁長さ・梁材質の条件で実験およびモルタルの弾性率推定を行い、適切な梁条件を評価した。

実験システムをFig. 2に示すが、レーザー光を集光してAI梁をLA加振し、LDVで振動を計測するものとした。試験開始時刻は、モルタル作製時の注水時刻とし、任意の時間が経過するごとに加振および計測を繰り返した。



(a) AI beam inserted in a mortar (b) AI beam

Fig. 1 Experiment object (Unit: mm)

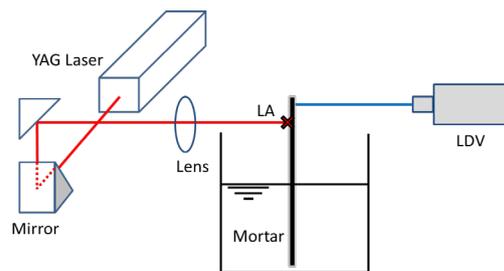


Fig. 2 Experiment system

#### 4. 研究成果

##### (1)実験結果(L=200mm, L<sub>1</sub>=92mm, L<sub>2</sub>=108mm)

振動計測より得られた、AI 梁の時刻歴応答の時間変化を Fig. 3 に示す。試験開始からの経過時間は、(a)が 75 分後、(b)が 600 分後である。時間経過により、振動の減衰に要する時間が長くなっており、振動が減衰しづらくなっていることが分かる。

次に、LDV からの速度出力に対するパワースペクトルの時間変化を Fig. 4 に示す。100~200 Hz の範囲に 1 次の顕著なピークが現れており、時間経過に伴って高周波数側へ推移している。また、600~1000 Hz に 2 次のピークが現れ、同様に時間経過と共に高周波数側へシフトしている。これらの変化は、モルタルの硬化に伴って AI 梁の支持が強固になったことが要因である。Fig. 5 に 1 次の共振周波数の時間変化を示す。時間経過に伴い、高周波数領域に推移する様子が分かる。また、十分時間が経過した後の 1 次の共振周波数は、片持ち梁の理論式から得られる共振周波数とおよそ一致した。

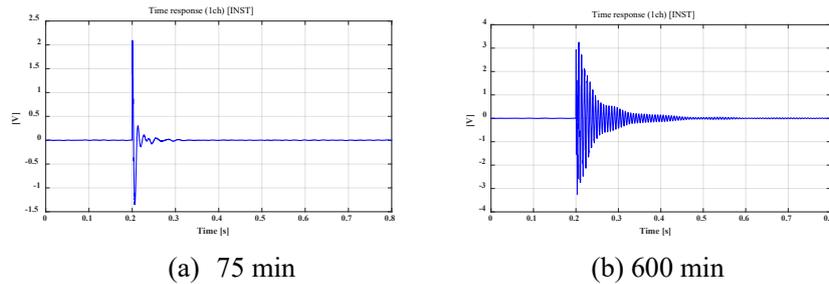


Fig. 3 Time response

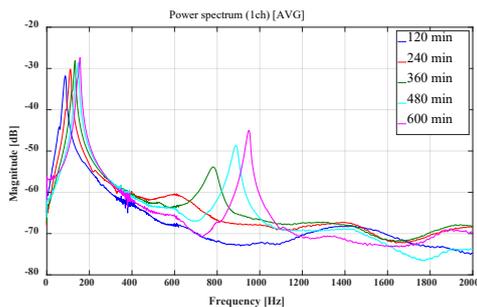


Fig. 4 Power spectrum

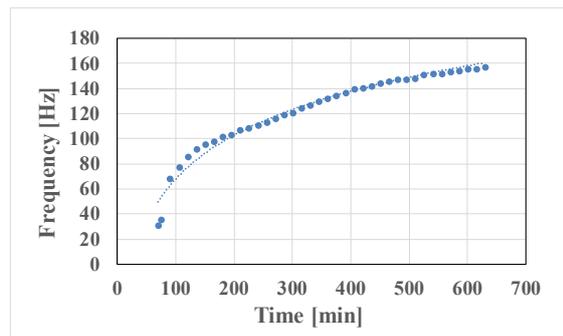


Fig. 5 Temporal change of 1st modal frequency

##### (2)FEM 解析によるモルタルの弾性率推定

モルタルの硬化状態を弾性率(ヤング率)で評価すべく、FEMによるモード周波数解析を行った。解析の実施にあたり、実験に用いた試験体に適合するFEMモデルを作成した。材料(AI梁およびモルタル)の物性値(密度、ポアソン比、弾性率)に関し、モルタルの弾性率を除き、標準値を与えた。すなわち、モルタルは均一に硬化すると仮定し、モルタルの弾性率を変数として解析を行った。

実験で得た経過時間と共振周波数の関係およびFEM解析で得たモルタルの弾性率と1次モード周波数の関係から、経過時間とモルタルの弾性率の関係が得られた。得られた関係と貫入抵抗試験の結果をFig. 6に示す。これより、時間経過に伴う弾性率および貫入抵抗値の増大傾向はおおよそ類似していることが分かる。変化の傾向として、貫入抵抗値の増加の方が緩やかであるが、これは温度の影響を受けやすい貫入抵抗試験の特徴が要因と考えられる。また、Fig. 7はレーザーを用い、異なるモルタル温度で行われた実験より得られた経過時間と弾性率の関係を表している。この結果から、レーザーによる試験結果は貫入抵抗試験の結果と比べてばらつきが小さく、温度の影響を受けづらいたことが確認された。これより、モルタル試験体表面で計測をしている貫入抵抗試験は、温度の影響を大きく受けるが、AI梁をモルタルの内部深くまで挿してその振動特性を評価する本手法では、表面温度の影響をあまり受けないモルタル内部の情報を抽出している可能性があると考えられる。

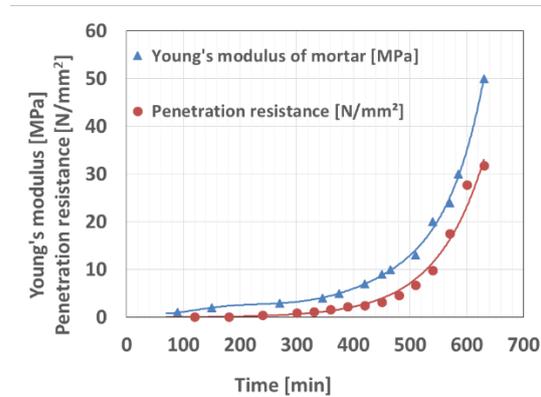


Fig. 6 Relationship between the Young's modulus and the elapsed time, and comparison with penetration resistance test

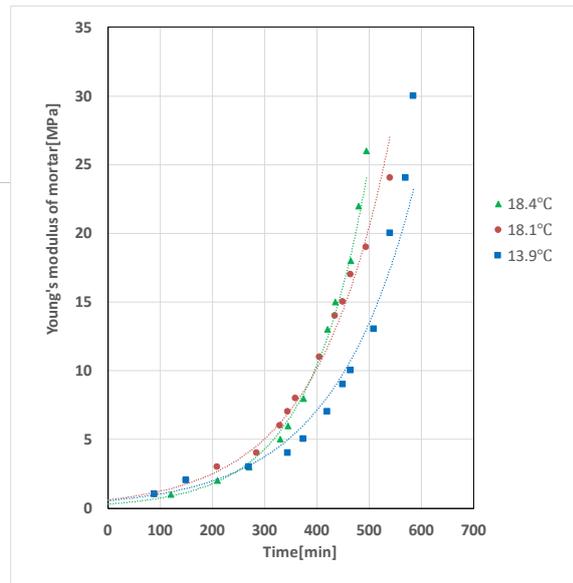


Fig. 7 Changes in Young's modulus of mortar over elapsed time at several temperatures

### (3)適切な梁長さに関する考察

さまざまな梁突出部長さおよび梁埋込部長さの条件で実験を実施したが、本研究成果報告書では2種類の長さの梁に対し、異なる条件(突出部長さ  $L_1$ :49mm, 98mm, 埋込部長さ  $L_2$ :100mm)で実施した結果を示す。

モルタルの硬化状態を弾性率(ヤング率)で評価すべく、(2)と同様にFEMによるモード周波数解析を行った。モルタルは均一に硬化すると仮定し、実験計測とFEM解析で得られる1次モード周波数から、モルタルの弾性率を推定した。その結果をFig. 8( $L_1=49\text{mm}$ )およびFig. 9( $L_1=98\text{mm}$ )に示す。これらの結果から、梁突出部長さが短いほど、1次モード周波数(弾性率)の変化が大きく、推定精度の面から適切であると考えられる。しかし、モルタルの弾性率は梁の長さに依存しないため、FEMで設定すべく適切なモルタル物性値について継続して検討する必要がある。

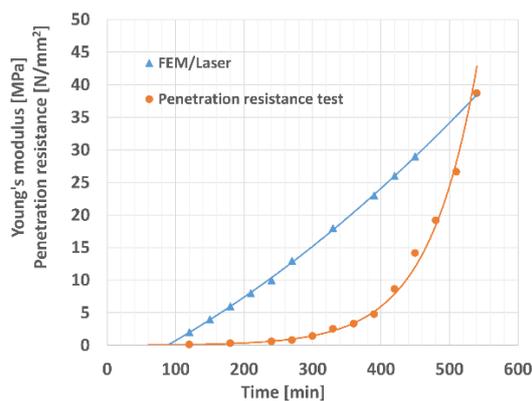


Fig. 8 Properties of the Young's modulus and the penetration resistance vs time ( $L_1=49\text{mm}$ )

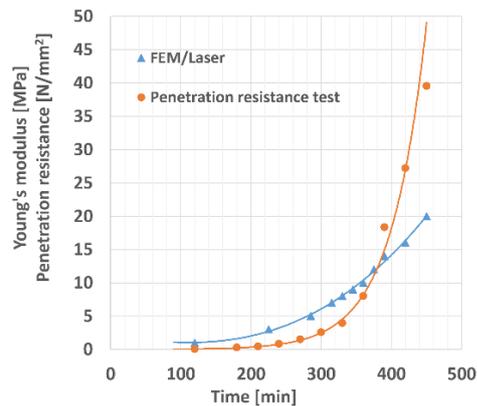


Fig. 9 Properties of the Young's modulus and the penetration resistance vs time ( $L_1=98\text{mm}$ )

### (4)異なる材質の梁を用いた検討

これまでの検討では、Al梁を対象とし、実験および評価を行った。しかし、Alをコンクリート(モルタル)内に埋め込んだ場合、化学反応によりAlが腐食するという懸念がある。実際に、これまでの結果において、試験体作成から数日以上経過すると、1次共振周波数が若干低下するという傾向がみられた。そこで、耐腐食性の高い材質の梁を用いて、同様の試験を実施した。材質として、Al-Mg合金、プラスチックおよびステンレスを採用した。これらの材質の梁で実験を実施したところ、試験体作成から十分な時間が経過した後も1次共振周波数は低下しないことが検証された。結果の一例として、ステンレスの梁を用いたときの1次共振周波数の変化および推定さ

れた弾性率の時間変化をそれぞれFig. 10およびFig. 11に示す。Fig. 11では、比較のため貫入抵抗試験で得られた結果も示している。同図から、Al梁で得られた結果と同様の傾向を示していることがわかる。この検討から、実環境で本手法を用いる場合、耐腐食性の高い材質の梁を用いることが重要であることが明らかになった。

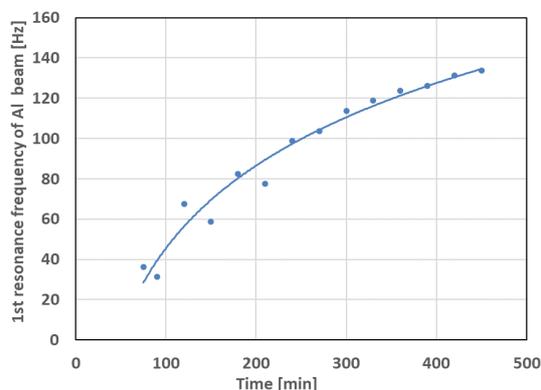


Fig. 10 Relationship between the 1st mode frequency and the elapsed time with a stainless beam

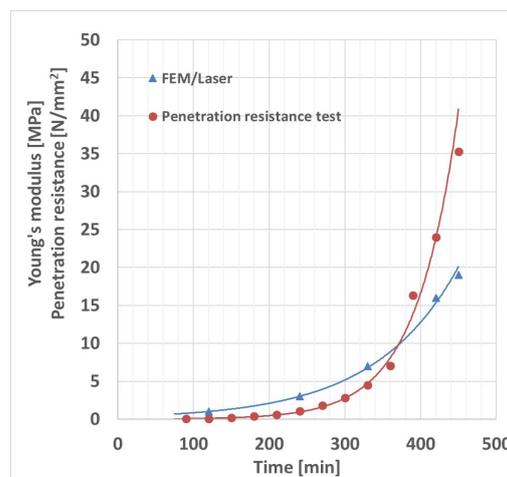


Fig. 11 Relationship between the Young's modulus and the elapsed time with a stainless beam

### (5)まとめ

Al梁を挿したモルタルをレーザー加振／計測し、モルタルの硬化モニタリングを行った。その結果、モルタルの硬化に伴い、Al梁の振動の減衰時間および固有モード周波数が変化することが確認された。また、実験条件に適合するFEM解析を行った。モルタルの弾性率の上昇に伴い、Al梁のモード周波数が高くなり、実験から得た変化と合致することが示された。そして、実験で得た共振周波数とFEM解析で得たモード周波数から、モルタルの弾性率の時間変化が得られた。この変化は、これまで用いられていた貫入抵抗試験の結果と矛盾しない硬化過程の推移を示した。さらに、さまざまな梁長・材質の条件で実験およびモルタルの弾性率推定を行い、適切な梁条件について考察した。今後、より多くの実験条件におけるデータを計測し、推定されるモルタル(コンクリート)弾性率のデータベースを構築することにより、硬化モニタリングシステムの実用化が期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 20件）

1. 著者名 Hosoya Naoki, Niikura Takanori, Hashimura Shinji, Kajiwara Itsuro, Giorgio-Serchi Francesco	4. 巻 162
2. 論文標題 Axial force measurement of the bolt/nut assemblies based on the bending mode shape frequency of the protruding thread part using ultrasonic modal analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement	6. 最初と最後の頁 No. 107914
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.measurement.2020.107914	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hiruta Toshiaki, Hosoya Naoki, Maeda Shingo, Kajiwara Itsuro	4. 巻 191
2. 論文標題 Experimental validation of vibration control in membrane structures using dielectric elastomer actuators in a vacuum environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 849 ~ 857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmecsci.2020.106049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Arai Nayuta, Miyake Masafumi, Yamamoto Kengo, Kajiwara Itsuro, Hosoya Naoki	4. 巻 10
2. 論文標題 Soft Mango Firmness Assessment Based on Rayleigh Waves Generated by a Laser-Induced Plasma Shock Wave Technique	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Foods	6. 最初と最後の頁 No. 323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/foods10020323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kajiwara Itsuro, Kitabatake Shigeki, Hosoya Naoki, Maeda Shingo	4. 巻 157-158
2. 論文標題 Design of dielectric elastomer actuators for vibration control at high frequencies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 849 ~ 857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmecsci.2019.05.019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hosoya Naoki, Ozawa Shota, Kajiwara Itsuro	4. 巻 456
2. 論文標題 Frequency response function measurements of rotational degrees of freedom using a non-contact moment excitation based on nanosecond laser ablation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 239 ~ 253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jsv.2019.05.024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hosoya Naoki, Kato Junya, Kajiwara Itsuro	4. 巻 134
2. 論文標題 Spherical projectile impact using compressed air for frequency response function measurements in vibration tests	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 No. 106295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ymsp.2019.106295	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiruta Toshiki, Hosoya Naoki, Maeda Shingo, Kajiwara Itsuro	4. 巻 330
2. 論文標題 Experimental evaluation of frequency response and firmness of apples based on an excitation technique using a dielectric elastomer actuator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 No. 112830
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2021.112830	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiruta Toshiki, Sasaki Kaishi, Hosoya Naoki, Maeda Shingo, Kajiwara Itsuro	4. 巻 182
2. 論文標題 Firmness evaluation of postharvest pear fruit during storage based on a vibration experiment technique using a dielectric elastomer actuator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Postharvest Biology and Technology	6. 最初と最後の頁 No. 111697
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.postharvbio.2021.111697	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hosoya Naoki, Katsumata Tsubasa, Kajiwara Itsuro, Onuma Takashi, Kanda Atsushi	4. 巻 148
2. 論文標題 Measurements of S0 mode Lamb waves using a high-speed polarization camera to detect damage in transparent materials during non-contact excitation based on a laser-induced plasma shock wave	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering	6. 最初と最後の頁 No. 106770
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlaseng.2021.106770	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件(うち招待講演 0件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Arai, N., Hosoya, N. and Kajiwara, I.
2. 発表標題 Soft tropical fruit assessment based on a non-contact non-destructive experimental modal analysis with laser technique
3. 学会等名 ISMA2020 International Conference on Noise and Vibration Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 比留田稔樹、細矢直基、前田真吾、梶原逸朗
2. 発表標題 誘電エラストマークチュエータ加振に基づくりんごの振動計測と硬さ評価
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石原宏基、比留田稔樹、細矢直基、前田真吾、梶原逸朗
2. 発表標題 マルチ誘電エラストマークチュエータを用いた膜構造の振動制御
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木海詩、比留田稔樹、梶原逸朗、細矢直基、前田真吾
2. 発表標題 誘電エラストマ-アクチュエータを用いた曲面を有する機械構造物の振動制御
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木源明、竹本喜昭、齊藤 亮介、梶原逸朗
2. 発表標題 レーザー加振/計測を用いたコンクリートの硬化モニタリング
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Niikura, T., Hosoya, N., Hashimura, S., Kajiwara, I. and Giorgio-Serchi, F.
2. 発表標題 Loosening detection of a bolted joint based on monitoring dynamic characteristics in the ultrasonic frequency region
3. 学会等名 The 18th Asia-Pacific Vibration Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶原逸朗, 秋田涼佑, 細矢直基
2. 発表標題 レーザー音響加振/計測技術を用いたパイプ構造の損傷検知
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木健吾, 佐々木源明, 齊藤亮介, 北垣亮馬, 梶原逸朗
2. 発表標題 非接触レーザー加振 / 計測技術を用いたタイル構造の健全性評価
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiruta, T., Ishihara, H., Hosoya, N., Maeda, S. and Kajiwara, I.
2. 発表標題 Vibration control of membrane structures using multiple dielectric elastomer actuators
3. 学会等名 The 21st International Conference on Control, Automation and Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古怒田真悟, 荒井那由他, 梶原逸朗, 細矢直基
2. 発表標題 レーザー誘起プラズマによるインパルス加振を用いたマンゴーの非接触非破壊硬さ評価
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 硬化体解析方法、硬化体解析システム、硬化体解析装置、及び硬化体解析プログラム	発明者 竹本喜昭、齊藤亮介、梶原逸朗	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-175172	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 構造物の振動特性の測定方法及び構造物の振動特性の測定装置	発明者 齊藤亮介、梶原逸朗、北垣亮馬	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-149080	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

北海道大学 大学院工学研究院 知的構造システム研究室ホームページ  
<https://s3.eng.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------